

# **Abschlussbericht**

(zur vertraulichen Behandlung)

zum Verbundvorhaben

**Extrem flache Kamerasysteme für Anwendung im Automobil**

**Akronym: X - FLAKSA**

**Teilprojekt: Nanotechnologische Replikationsverfahren**

Teilprojektkoordinator:	Frank Kühnlenz Fresnel Optics GmbH Flurstedter Marktweg 13 D-99510 Apolda
-------------------------	--

Zahlungsempfänger: <b>Fresnel Optics GmbH</b> <b>Flurstedter Marktweg 13</b> <b>D - 99510 Apolda</b>	Förderkennzeichen:  <b>13N8799</b>
Vorhabensbezeichnung: <b>Extrem flache Kamerasysteme für Anwendungen im Automobil (X - FLAKSA)</b> <b>Teilprojekt: Nanotechnologische Replikationsverfahren</b>	
Laufzeit des Vorhabens: <b>01.03.2005 - 31.08.2008</b>	
Berichtszeitraum: <b>01.03.2005 - 31.08.2008</b>	

## 1 Motivation und Zielstellung des Vorhabens

### 1.1 Motivation und Gesamtzielstellung

Herkömmliche abbildende digitale Systeme (Abb. 1), wie sie aktuell z. B. in Kameras von Mobilfunktelefonen eingesetzt werden, weisen eine deutliche Miniaturisierung der Optoelektronik auf. Allerdings verhindert das Festhalten an klassischen Prinzipien der optischen Abbildung mit einfacher Skalierung der herkömmlichen optischen Systeme einen Durchbruch der Miniaturisierung hin zu Baulängen von unter einem Millimeter. Die Miniaturisierbarkeit der nach klassischen Prinzipien der optischen Abbildung arbeitenden Systeme wird immer durch die Abhängigkeit der möglichen Vergrößerung von der Brennweite und damit von der Baulänge des Systems limitiert werden. Aus diesem Grund konnte die Baulänge herkömmlicher Objektive selbst für geringe Auflösungen bisher nicht unter 6 mm reduziert werden. Eine weitere Reduktion der Baulänge dieser Objektive kann prinzipiell durch eine Verringerung der Pixelgröße der Imager realisiert werden, allerdings erscheint dieser Ansatz sowohl aus technologischen Gründen als auch im Hinblick auf die damit mögliche geringe Lichtstärke als nicht zielführend.

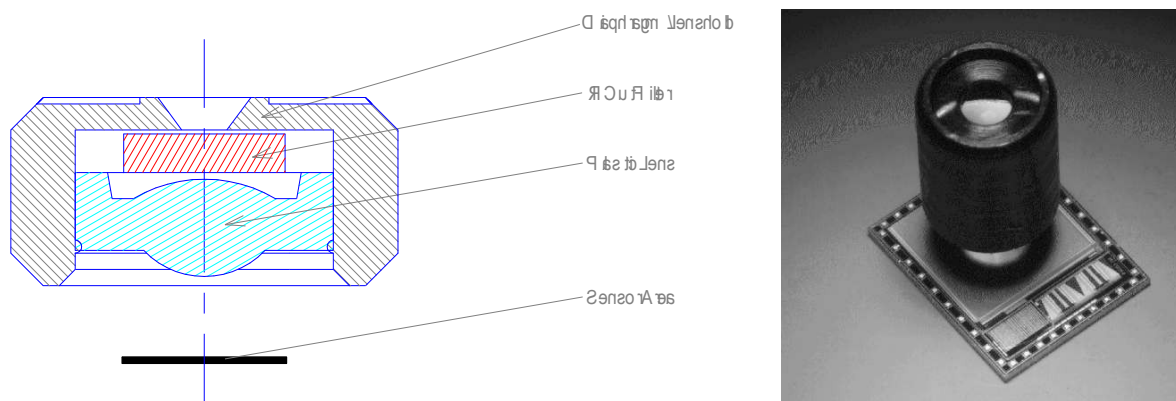


Abb. 1: Aufbaukonzept (links) und mögliche Ausführungsform (rechts) eines herkömmlichen miniaturisierten Objekives zur digitalen Bilderfassung

Zielstellung des Vorhabens X-FLAKSA war die Entwicklung und der Aufbau eines miniaturisierten, ultra-flachen, digitalen Kamerasystems mit einer Gesamtbaulänge von unter 0,8 mm. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen klassischen Systemen basiert das ultra-flache Kamerasystem auf einem opto-elektronischen System, das in Analogie zu den aus der Natur bekannten Facettenaugen von Insekten aufgebaut ist. Dieses, im Rahmen des Vorhabens angestrebte und auf künstlichen Facettenaugen basierende, neuartige Abbildungskonzept weist das Potential zu einer deutlichen Verringerung der erforderlichen Baulänge eines digitalen Bilderfassungssystems auf weit unter einen Millimeter auf, wobei die realisierbare Abbildungsqualität zur Personen-, Objekt- und Bewegungserkennung hinreichend ist. Neben Anwendungen im Automotive-Bereich finden solche Kamerasysteme zur digitalen Bilderfassung von Personen und Gegenständen überall dort Anwendung, wo extrem kurzbauende, kompakte und kostengünstige Anordnungen gefordert werden.

## 1.2 Prinzip des künstlichen Facettenauges

Das Abbildungsprinzip eines miniaturisierten, auf künstlichen Facettenaugen basierenden, Objektives zur digitalen Bilderfassung ist in Abb. 2 dargestellt. Die Funktionsweise des Objektives beruht auf der separaten Abbildung verschiedener Winkelsegmente des Objektraumes durch eine Vielzahl von parallelen optischen Kanälen. Die Abtastung in der Bildebene erfolgt mit einer Pixelmatrix, wobei die Gesamtheit der übertragenen Bildpunkte auf dem Imagerchip ein Bildmuster generiert, das eine Rekonstruktion des abgebildeten Objektes erlaubt. In dem in Abb. 2 dargestellten Aufbaukonzept des künstlichen Facettenauges wird die Abtastung des Gesichtsfeldes mittels einer Pitchdifferenz zwischen Linsen- und Detektor-Array realisiert.

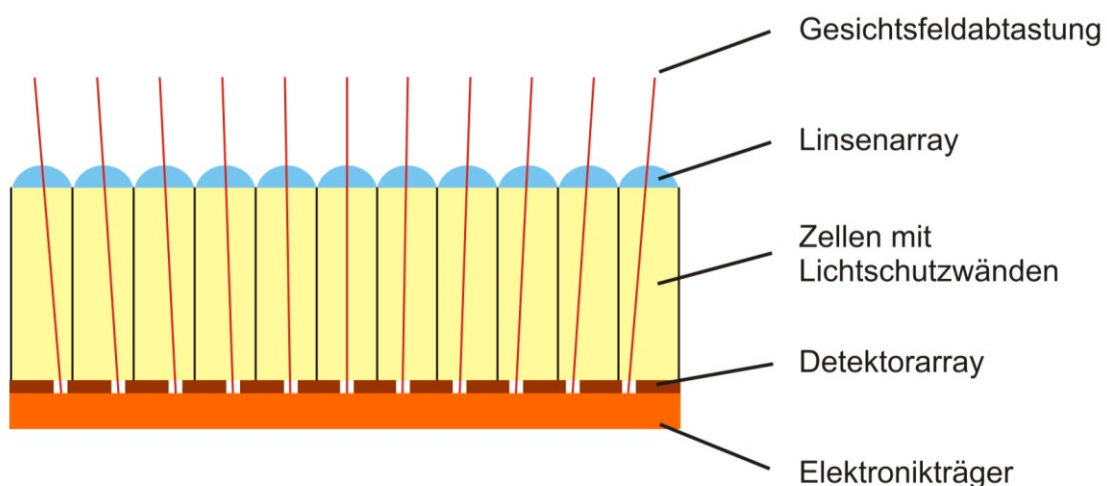


Abb. 2: Aufbaukonzept eines auf künstlichen Facettenaugen basierenden miniaturisierten Objektives zur digitalen Bilderfassung

Im Vergleich zu den herkömmlichen opto-elektronischen Bildsensoren mit hohem Füllfaktor sind für das Prinzip der künstlichen Facettenaugen Imager mit ebenfalls kleinen Pixeln aber geringerem Füllfaktor erforderlich (Abb. 2). Das Prinzip des künstlichen Facettenauges ist deshalb besonders für Sensoren mit geringem Füllfaktor geeignet, die konstruktionsbedingt mit Linsenarrays zur Erhöhung des

Füllfaktors und zusätzlich mit einem vorgeschalteten Objektiv zur Realisierung der optischen Abbildung versehen werden müssen. Die Funktionalität der optischen Abbildung kann hier in das Linsenarray integriert werden, wodurch ein klassisches Objektiv, das die eigentliche Baulänge einer herkömmlichen digitalen Kamera bestimmt, entfällt. Zusätzlich kann der durch den geringen erforderlichen Füllfaktor der Detektorpixel gewonnenen Platz auf der Sensorfläche zur pixelnahen Vorverarbeitung der Bildsignale genutzt werden.

Das System des künstlichen Facettenauges funktioniert nur dann, wenn bestimmte Rahmenbedingungen erfüllt werden. So muß das Mikrolinsenarray beugungsbegrenzt arbeiten, d. h. die die maximal akzeptable Formabweichung der Linsen und damit die zulässige Schwankung der Brennweite über das Mikrolinsenarray darf nicht mehr als 1% betragen, was wiederum eine maximal zulässige Dickenschwankung in der gleichen Größenordnung voraussetzt. Von besonderer Bedeutung für das System des künstlichen Facettenauges ist die Einhaltung des aus dem optischen Design resultierenden axialen Abstandes zwischen Linsen- und Pinhole-Array zur Realisierung der Gesichtsfeldabtastung, wobei für die Funktionalität des künstlichen Facettenauges Genauigkeiten besser als  $\pm 2 \mu\text{m}$  erforderlich sind. Zusätzlich dazu ist es zur Unterdrückung von Geisterbildern erforderlich, die durch Linsen- und Pinhole-Array definierten optischen Kanäle durch eine geeignete optische Isolation vollständig voneinander zu trennen.

### **1.3 Wissenschaftlich-technische Arbeitsziele**

Zur Realisierung dieses grundsätzlich aus der Natur bekannten aber bisher in der Technik nicht verfügbaren Abbildungsprinzips des Facettenauges ist es erforderlich, bereits vorhandene Technologien bzw. auch Technologieansätze im Rahmen des Vorhabens bis hin zu geeigneten Fertigungsverfahren für die Hochvolumenproduktion weiterzuentwickeln. Im Konsortium bearbeiteten die Projektpartner dafür die folgenden Aufgabenstellungen:

- IOF Jena: Optikdesign, Prototyping und Charakterisierung
- ZMD/Awaiba: Optoelektronik-Entwicklung
- MPD: Aufbau- und Verbindungstechnologie
- Aspect Systems: Elektronische und optoelektronische Charakterisierung
- Siemens CT: Charakterisierung des Gesamtsystems
- Siemens VDO: Anwendungs- und Systemspezifikation

Die im Rahmen dieser Aufgabenstellungen bearbeiteten Fragen sowie deren Ergebnisse sind in den Zwischen- sowie den Abschlußberichten der jeweiligen Projektpartner ausführlich dokumentiert.

Der Schwerpunkt der Fresnel Optics GmbH innerhalb des Projektverbundes bestand in der Bearbeitung von Fragestellungen zur Fertigung von Werkzeugoriginalen mittels Präzisionsdiamantschneiden, der Replikation von

Werkzeugoriginalen mittels galvanischer Abformung sowie der Replikation der auf den Werkzeugen aufgetragenen Strukturen in Kunststoff.

Eine grundlegende Voraussetzung für die Replikation optischer Komponenten ist die Erstellung der entsprechenden Werkzeugoriginalen und deren Replikation. Da die Gefahr der Beschädigung des Werkzeuges während des Abformprozesses besteht ist der direkte Einsatz von Werkzeugoriginalen nicht unbedingt sinnvoll. Aus diesem Grund ist die Verwendung von Fertigungswerkzeugen üblich, die z. B. durch galvanische Replikation aus dem Original erstellt werden. Ein Arbeitspaket von Fresnel Optics beinhaltete deshalb die Untersuchung von Möglichkeiten zur Erstellung der Werkzeugoriginalen und deren Replikation. Die durchgeführten Arbeiten erfolgten parallel zu den Untersuchungen zur Replikation der optischen Komponenten und unter Verwendung der jeweils aktuell vorliegenden Optischen Designs bzw. Werkzeugoriginalen.

Vom Projektpartner IOF wurden Werkzeugoriginalen für Mikrolinsenarrays erstellt die anschließend von Fresnel Optics im Precision Technology Center in den USA, das Teil des Unternehmensverbundes ist, galvanisch repliziert wurden. Mit den daraus resultierenden Prägewerkzeugen wurden die optischen Strukturen mittels Heißprägen in PMMA repliziert und hinsichtlich der Ebenheit, der Einhaltung der Formgenauigkeit der Einzellinsen und der lateralen Präzision über den gesamten Wafer analysiert.

Ein wichtiger Schwerpunkt der Arbeiten von Fresnel Optics war die Untersuchung von Technologien zur Erzeugung von optisch voneinander getrennten Kanälen. Der Schwerpunkt hierfür lag in der Erzeugung einer aus dem optischen Design resultierenden Struktur aus gekreuzten Gräben mittels Prägetechnologie und umfasste sowohl die Erstellung von Werkzeugoriginalen mittels unterschiedlicher Verfahren wie Präzisionsdiamantschneiden, Tiefenätzen in Silicium oder auch UV-Replikation als auch die daran anschließende galvanische Replikation dieser Werkzeugoriginalen und die Abformung in Kunststoff. Die Herausforderung sowohl bei der Originalerstellung als auch den anschließenden Replikationsschritten war hier die Array-Anordnung für eine künftige Montage des Gesamtsystems im Wafermaßstab sowie das extrem hohe Aspektverhältnis der Struktur.

Als Alternative zur Kreuzgrabenstruktur für die Separation der optischen Kanäle wurde versucht, die Abgrenzung mittels Blenden bzw. geschwärzten Bereichen direkt auf den optischen Oberflächen zu realisieren. Die hierfür erforderlichen Werkzeugoriginalen wurden vom Projektpartner IOF erstellt und anschließend im Precision Technology Center galvanisch repliziert. Mit den daraus resultierenden Prägewerkzeugen wurden bei Fresnel Optics Abformversuche mittels Heißprägen in PMMA durchgeführt.

## **2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse**

### **2.1 Replikation von optischen Strukturen**

Eine entscheidende Komponente des auf dem Prinzip der künstlichen Facettenaugen basierenden Objektives ist das Mikrolinsen-Array zur Realisierung der optischen Abbildung, das im Rahmen des Vorhabens im Wafermaßstab in

Kunststoff abgeformt werden sollte. Hierzu war in einem ersten Schritt die Erstellung des entsprechenden Werkzeugoriginals erforderlich, aus dem durch galvanische Replikation das eigentliche Fertigungswerkzeug erstellt wurde. Die Replikation der Werkzeugoriginals ist erforderlich, da sich deren direkter Einsatz im Fertigungsprozeß aufgrund der Gefahr einer Beschädigung verbietet. Die anschließende Fertigung der optischen Komponente erfolgte unter Verwendung der replizierten Werkzeuge. Dabei stellt sowohl das Konzept des künstlichen Facettenauges als auch die Fertigung im Wafermaßstab hohe Anforderungen an die Präzision der Kunststoffabformungen im Hinblick auf Ebenheit, Formtreue und Schrumpfung der Strukturen auf dem Wafer und der dadurch schwankenden Positioniergenauigkeit. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Replikation von Werkzeugoriginalen und die anschließende Replikation der darauf enthaltenen optischen Strukturen nicht unabhängig voneinander zu untersuchen.

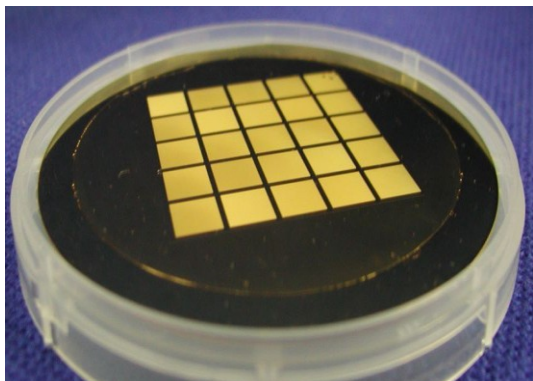


Abb. 3: Master mit Mikrolinsenarrays in Array-Anordnung (5 × 5)

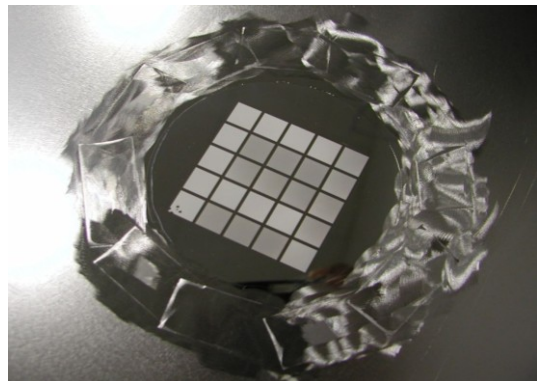


Abb. 4: Repliziertes Werkzeug zur Abformung der Mikrolinsenarrays

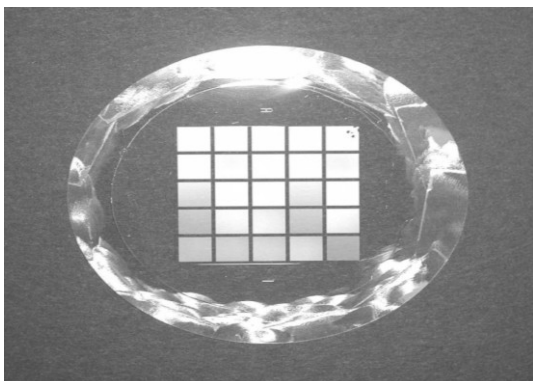


Abb. 5: Mit dem in Abb. 4 gezeigten Werkzeug gefertigtes Linsen-Arrays

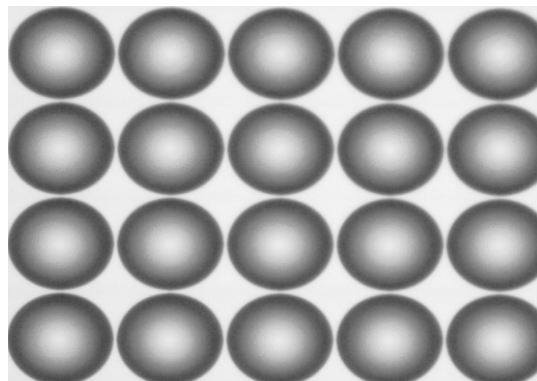


Abb. 6: Ausschnitt aus einem der Linsen-Arrays unter dem Mikroskop

Für die entsprechenden Untersuchungen wurde vom Projektpartner IOF Jena ein Werkzeugoriginal (Photoresist mit Goldbeschichtung) mit 25 Mikrolinsen-Arrays in einer Array-Anordnung (5 × 5) zur Verfügung gestellt (Abb. 3), das im Hinblick auf Ebenheit, Formtreue und lateraler Präzision über den Wafer vermessen wurde. Davon ausgehend wurde untersucht, ob ein Photoresist-Original zur Erstellung eines Fertigungswerkzeuges mittels galvanischer Replikation geeignet ist. Das im Precision Technology Center in den USA replizierte Fertigungswerkzeug ist in Abb. 4 dargestellt und wurde anschließend bei Fresnel Optics genutzt, um die darauf enthaltenen optischen Strukturen mittels Heißprägeverfahren in Kunststoff abzuformen (Abb. 5 und Abb. 6). Die Kunststoffabformungen wurden anschließend hinsichtlich der realisierten Ebenheit, Formtreue und lateralen



Präzision über den Wafer vermessen und mit den am Werkzeugoriginal ermittelten Werten verglichen.

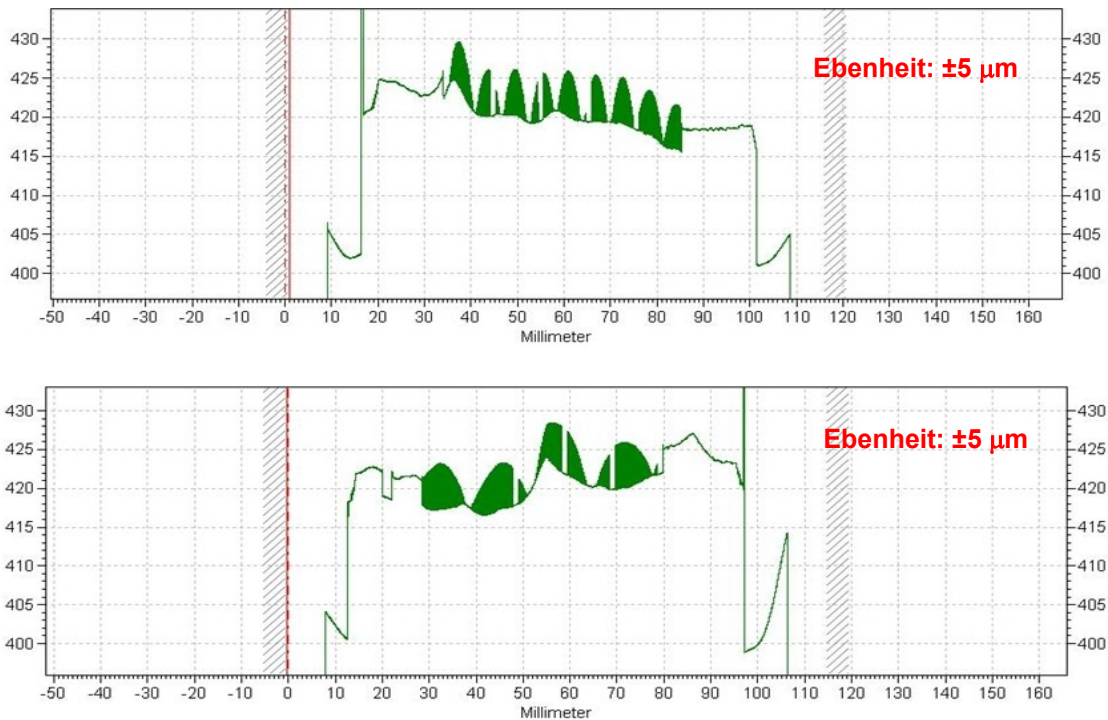


Abb. 7: Messung der Dickenschwankung am Werkzeugoriginal vom IOF Jena in zwei zueinander senkrechten Richtungen

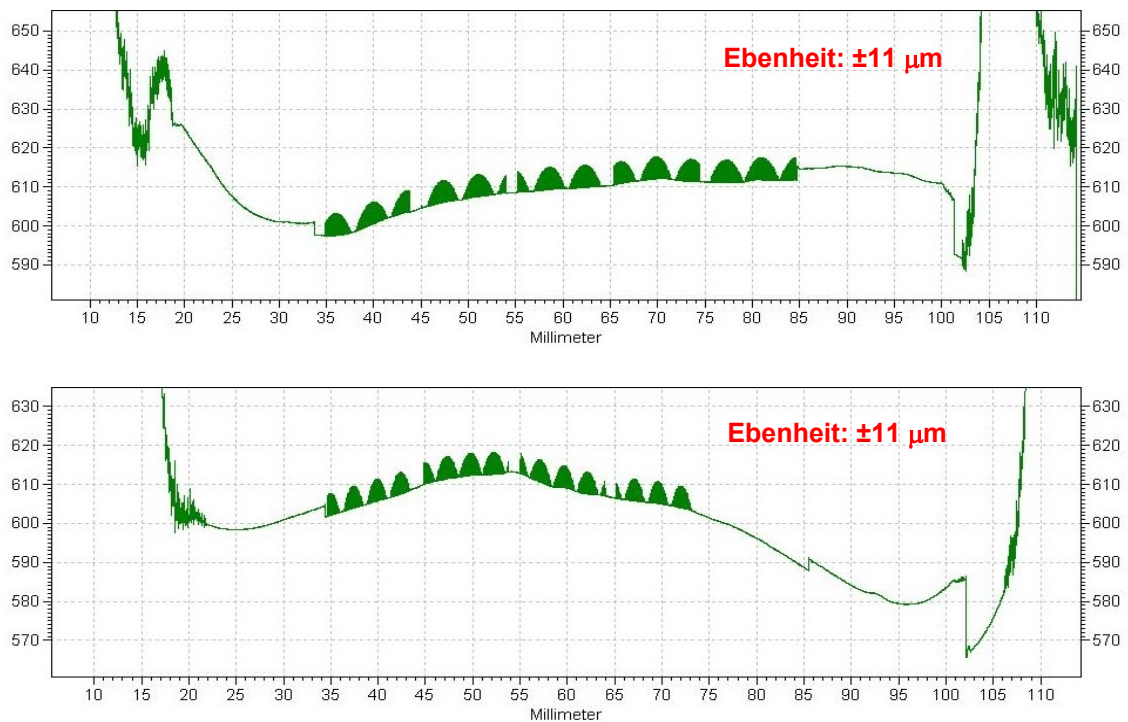


Abb. 8: Messung der Dickenschwankung analog Abb. 7 an einer mit dem galvanisch replizierten Werkzeug hergestellten Kunststoffabformung

In Abb. 7 ist das Ergebnis der am Werkzeugoriginal vom IOF Jena durchgeführten Messung der Dickenschwankung (Ebenheit) in zwei zueinander senkrechten

Richtungen dargestellt. Die am Werkzeugoriginal realisierte Ebenheit über den gesamten Wafer beträgt etwa  $\pm 5 \mu\text{m}$ . Vergleichend ist in Abb. 8 eine Messung der Ebenheit an einer mit dem galvanisch replizierten Werkzeug hergestellten Kunststoffabformung dargestellt. Die Messung an der Abformung erfolgte analog zur Messung am Werkzeugoriginal ebenfalls in zwei zueinander senkrechten Richtungen, wobei die realisierte Ebenheit der Abformung  $606 \pm 11 \mu\text{m}$  beträgt und damit um den Faktor 1,8 größer als die zulässige Toleranz von  $\pm 6 \mu\text{m}$ .

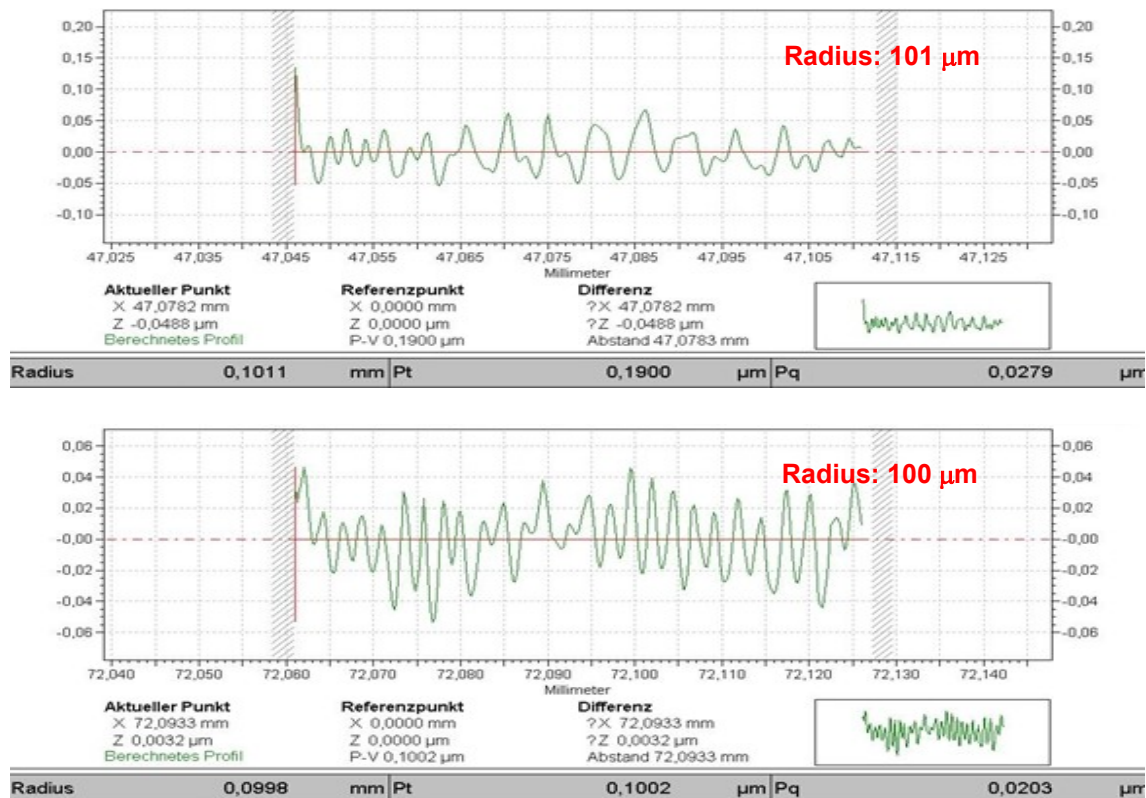


Abb. 9: Messung zur Bestimmung des Linsenradius am Werkzeugoriginal vom IOF Jena (oben) und an einer mit dem galvanisch replizierten Werkzeug hergestellten Kunststoffabformung (unten)

Weiterhin von Bedeutung für das System des künstlichen Facettenauges ist die präzise Umsetzung der aus dem Optikdesign resultierenden Strukturen in der Kunststoffabformung (Formtreue). Um die Einhaltung der Formtreue zu evaluieren wurden die Krümmungsradien einzelner Mikrolinsen auf den mittels des galvanisch replizierten Werkzeuges erstellten Kunststoffabformungen vermessen (Abb. 9 unten) und mit den Krümmungsradien der entsprechenden Linsen im Werkzeugoriginal (Abb. 9 oben) verglichen. Im Vergleich mit den Linsenradien von  $101 \mu\text{m}$  im Werkzeugoriginal beträgt der Linsenradius der Kunststoffabformungen  $100 \mu\text{m}$ . Die Abweichung vom Sollwert beträgt etwa 1% und liegt damit innerhalb des zulässigen Toleranzbereiches.

Von besonderer Bedeutung für die Funktionalität des künstlichen Facettenauges ist die präzise Einhaltung des aus dem optischen Design resultierenden axialen Abstandes zwischen Linsen- und Pinhole-Array zur Realisierung der erforderlichen Gesichtsfeldabtastung. In Bezug auf das Mikrolinsen-Array erfordert dies eine entsprechend hohe laterale Positioniergenauigkeit der Mikrolinsen, speziell auch



im Hinblick auf die Fertigung im Wafermaßstab. Die Evaluierung der lateralen Präzision über den gesamten Wafer erfolgte anhand von Längenmessungen an den in Kunststoff abgeformten Mikrolinsen-Arrays und Vergleich der Meßwerte mit dem berechneten Sollwert. Die Messungen erfolgten an jedem Wafer an jeweils drei unterschiedlichen Positionen sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung. Das Meßprinzip nebst der ermittelten Ausdehnungen des Wafers an den sechs Meßpositionen ist in Abb. 10 dargestellt.

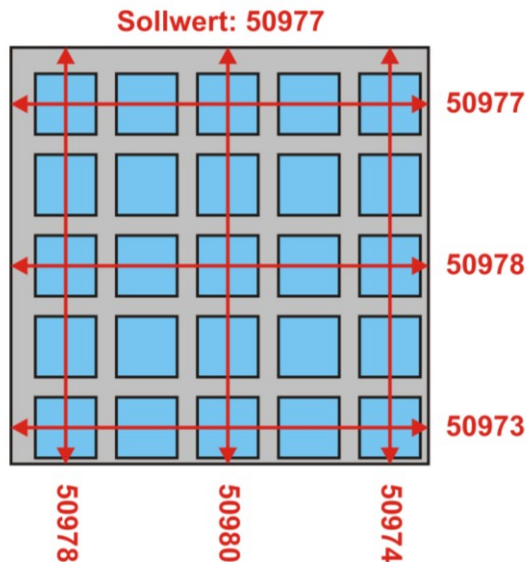


Abb. 10: Laterale Ausdehnung der in Kunststoff abgeformten Wafer zur Ermittlung der lateralen Präzision (Positioniergenauigkeit)

Aus den in Abb. 10 angegebenen und aus mehreren Messungen bestimmten Werten ergibt sich eine mittlere laterale Ausdehnung des geprägten Wafers von  $50977 \pm 5 \mu\text{m}$ . Verglichen mit dem berechneten Sollwert von  $50977 \mu\text{m}$  beträgt die Schwankung  $\pm 5 \mu\text{m}$  und ist damit um den Faktor 2,5 größer als die zulässige Toleranz von  $\pm 2 \mu\text{m}$ .

Zusammenfassend ergeben sich die folgenden Aussagen bezüglich der erzielten Ergebnisse für das Heißprägen der Mikrolinsen-Arrays im Wafermaßstab:

- Die Formabweichung der Mikrolinsen und die resultierende Schwankung der Brennweite liegt mit 1% innerhalb des zulässigen Toleranzbereiches.
- Die Ebenheit (Dickenschwankung) über den Wafer ist mit  $\pm 11 \mu\text{m}$  um einen Faktor von 1,8 größer als die zulässige Toleranz von  $\pm 6 \mu\text{m}$ .
- Die laterale Präzision über den Wafer ist mit  $\pm 5 \mu\text{m}$  um einen Faktor von 2,5 größer als die zulässige Toleranz von  $\pm 2 \mu\text{m}$ .

Diese Ergebnisse belegen, daß sowohl das galvanisch replizierte Werkzeug als auch der mittels Heißprägen abgeformte Wafer die geforderte Präzision zumindest hinsichtlich der Formtreue der Mikrolinsen erfüllen. Die ermittelten Schwankungen, sowohl in der Ebenheit als auch in der lateralen Präzision über den gesamten Wafer, können auf die Schrumpfung des Polymers während des Prägeprozesses und der anschließenden Abkühlphase zurückgeführt werden. Ein Ansatz für eine bessere Kontrolle der Schrumpfung ist der Einsatz eines Prägewerkzeuges mit elektrischer Heizung und Wasserkühlung. Damit eröffnet sich die Möglichkeit eines optimierten Temperaturregimes während des Prägens und Abkühlens, das zu einer verbesserten Ebenheit und lateralen Präzision über den gesamten Wafer führen kann. Um dies zu realisieren wurde bei Fresnel Optics in Zusammenarbeit

mit externen Partnern ein entsprechendes Prägewerkzeug (Abb. 11) getestet und anschließend für die Anforderungen von Fresnel Optics modifiziert und aufgebaut.



Abb. 11: Elektrisch geheiztes und wassergekühltes Prägewerkzeug zur verbesserten Kontrolle des Schrumpfes

Mit diesem Werkzeug ist die Fertigung von Optiken sowohl als Einzelelement für Prototypen als auch im Wafermaßstab bis hin zu einem Durchmesser von 260 mm möglich. Das modifizierte Prägewerkzeug wurde im Juni 2008 in Betrieb genommen und erste Untersuchungen im Rahmen kundenspezifischer Projekte haben gezeigt, daß damit auch die für das künstliche Facettenauge erforderlichen Toleranzen bzgl. Ebenheit und lateraler Präzision erreicht werden können.

## 2.2 Abgrenzung von optischen Kanälen mittels Kreuzgrabenstruktur

Die Untersuchung von Technologien zur Separation benachbarter Kanäle, wobei ein Kanal den Abbildungsweg zwischen einer Linse des Mikrolinsen-Arrays und dem zugeordneten Pinhole des Pinhole-Arrays definiert, war ein wesentlicher Schwerpunkt der Arbeiten von Fresnel Optics im Rahmen des Vorhabens. Die vollständige optische Separation der Kanäle ist von grundlegender Bedeutung für die Funktionalität des künstlichen Facettenauges und erforderlich, um ein Übersprechen zwischen benachbarten Kanälen und die daraus resultierende Entstehung von Geisterbildern zu verhindern.

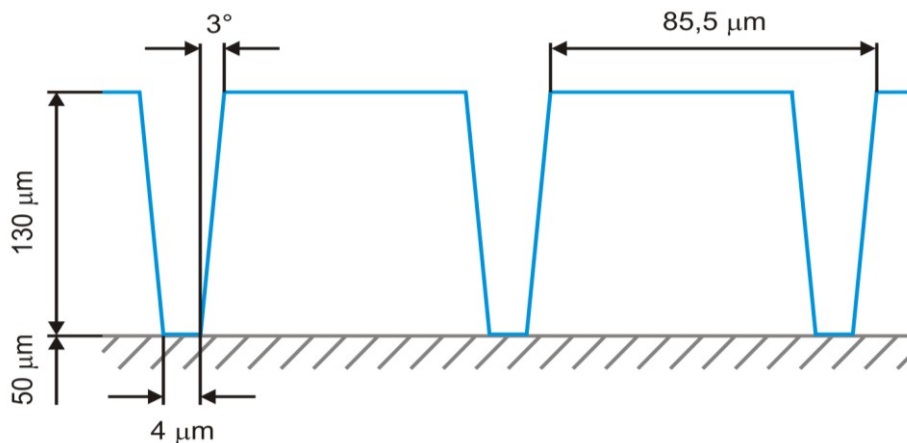


Abb. 12: Schnittbild der Struktur aus gekreuzten Gräben in einer Ebene zur Veranschaulichung der geometrischen Verhältnisse

Ein Ansatz zur Realisierung der Kanalseparation war die Erzeugung einer Struktur aus gekreuzten Gräben zwischen Optik-Array und Imager. Durch Schwärzen der Grabenwände, z. B. durch Verfüllen mit schwarzen Polymer, kann die gewünschte Kanalseparation erreicht werden. Die Geometrie der Kreuzgrabenstruktur wird durch das Design des Mikrolinsen-Arrays und des Imagerchips bestimmt und ist in Abb. 12 und Abb. 13 dargestellt. Die Struktur ist aufgrund ihrer Geometrie sowohl für die Werkzeugfertigung als auch bei der anschließenden Abformung in Kunststoff höchst anspruchsvoll. Die Herausforderung liegt sowohl in der Breite der Gräben von  $4\text{ }\mu\text{m}$  an der Grabensohle, in der großen Tiefe von  $130\text{ }\mu\text{m}$  sowie im zu realisierenden Pitch von  $85,5\text{ }\mu\text{m}$  begründet. Zusätzlich dazu weisen die Grabenwände einen Winkel von  $3^\circ$  auf und sind damit extrem steil.

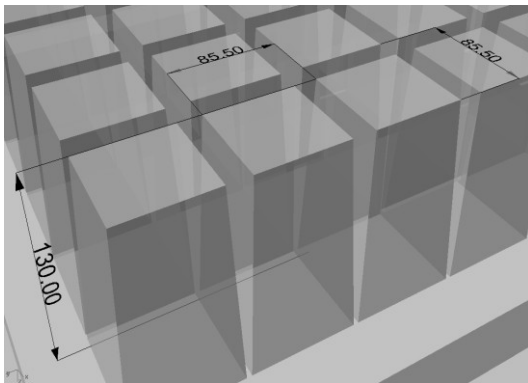


Abb. 13: Dreidimensionale Darstellung der Struktur aus gekreuzten Gräben zur Kanalseparation

Als ein erster Ansatz zur Erstellung der Kreuzgrabenstruktur wurde versucht, ein Werkzeugoriginal für ein  $2 \times 2$  Sensorarray mittels Präzisionsdiamantschneiden am Precision Technology Center in den USA zu erstellen. Dieser Ansatz erforderte schon vorab eine exakte Vorbereitung, da z. B. aufgrund der sehr speziellen Strukturgeometrie auch Diamanten mit einer entsprechend speziellen Geometrie der Schneidfläche beschafft werden mußten. Die Struktur wurde auf Basis des bei Fresnel Optics erstellten Werkzeuglayouts direkt geschnitten, d. h. aufgrund der in Abb. 13 veranschaulichten spezifischen Geometriemerkmale kann im Werkzeugoriginal nur die Generation mittels Präzisionsdiamantschneiden realisiert werden, die eigentlich in der Kunststoffabformung enthalten sein soll.

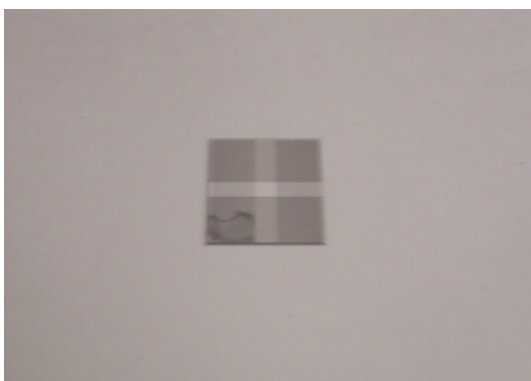


Abb. 14: Direkt geschnittenes Array der Kreuzgrabenstruktur

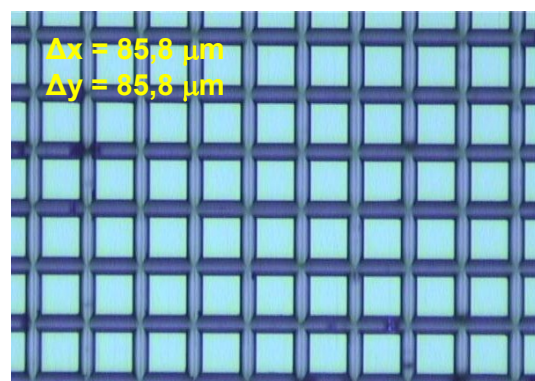


Abb. 15: Mikroskopbild der direkt geschnittenen Kreuzgrabenstruktur

In Abb. 14 und Abb. 15 ist das direkt geschnittene Werkzeugoriginal ( $2 \times 2$ ) bzw. ein Ausschnitt aus der Kreuzgrabenstruktur unter dem Mikroskop dargestellt. Der realisierte Pitch beträgt in beiden Richtungen inklusive Schrumpfung  $85,8\text{ }\mu\text{m}$  und

entspricht damit den Vorgaben aus dem Werkzeuglayout. Auf die galvanische Replikation eines Fertigungswerkzeuges wurde verzichtet, da bedingt durch die extreme Strukturgeometrie abzusehen war, daß sich Original- und repliziertes Fertigungswerkzeug nach der Galvanik nicht ohne Beschädigung voneinander separieren lassen. Aus diesem Grund wurde für die Abformung in Kunststoff das mittels Präzisionsdiamantschneiden hergestellte und mit Nickel beschichtete Werkzeugoriginal eingesetzt, wodurch die erfolgreich realisierten Abformungen (Abb. 16 und Abb. 17) die negative Generation der eigentlich zu realisierenden Struktur aufweisen. Der in den Abformungen realisierte Pitch beträgt in beiden Richtungen zueinander senkrechten Richtungen  $85,5\ \mu\text{m}$  und entspricht damit dem durch das optische Design vorgegebenen Wert.

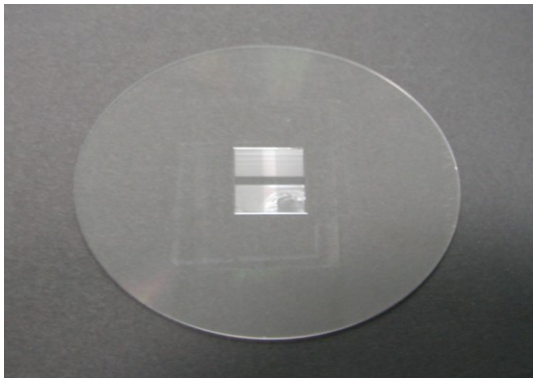


Abb. 16: Kunststoffabformung der Kreuzgrabenstruktur

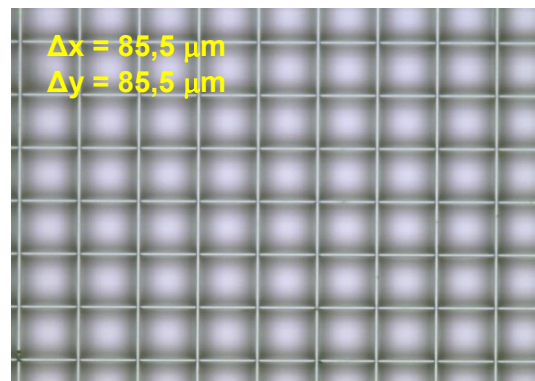


Abb. 17: Mikroskopaufnahme der abgeformten Kreuzgrabenstruktur

Die Ergebnisse belegen, daß das Präzisionsdiamantschneiden für die Erstellung von Werkzeugoriginalen mit aufgrund ihrer Geometrie fertigungstechnisch höchst anspruchsvollen Strukturen, wie z. B. die Kreuzgrabenstruktur, prinzipiell geeignet ist. Des weiteren konnte gezeigt werden, daß die Strukturen mit der geforderten Präzision in Kunststoff abgeformt werden können. Aufgrund der spezifischen Geometrie der für das künstliche Facettenauge erforderlichen Kreuzgrabenstruktur konnte nur die negative Generation der eigentlich zu realisierenden Struktur in Kunststoff abgeformt werden. Die Frage der Generation ist bei der Umsetzung anderer Strukturgeometrien lösbar und spielt dort keine Rolle mehr.

Da bereits während der Erstellung des Werkzeuglayouts und in den Diskussionen mit der Werkzeugfertigung zu erkennen war, daß mit einem diamantgeschnittenen Werkzeugoriginal nur die negative Generation der eigentlich zu realisierenden Struktur in den Kunststoffabformungen umsetzbar ist, wurde parallel dazu nach einer alternativen Lösung zur Erstellung eines Werkzeugoriginals mit der richtigen Generation gesucht. Damit sollte gleichzeitig die Realisierung der Kreuzgrabenstruktur im Wafermaßstab sowie der Aufbau eines Werkzeugbaumes ermöglicht werden.

Aufgrund der steilen Wände der Gräben wurde als geeignetes Verfahren für die Erstellung eines Werkzeugoriginals das Tiefenätzen in Silicium (Bosch-Prozeß) gewählt. Für die Realisierung im Wafermaßstab wurde von Fresnel Optics das Layout für ein  $(7 \times 6) - 4$  Sensor-Array erstellt. Daraus wurde bei einem externen Partner, dem Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien der TU Ilmenau, ein Maskenlayout für den Bosch-Prozeß entwickelt und damit anschließend ein Werkzeugoriginal in Silicium erstellt (Abb. 18). Das Werkzeugoriginal wurde bei



Fresnel Optics mit einer leitfähigen Startschicht aus Gold für den Galvanikprozeß versehen (Abb. 19). Daran anschließend wurde am Precision Technology Center zur Erstellung eines Prägewerkzeuges galvanisch Nickel (Abb. 20) mit einer Dicke von 1,8 mm und einem Durchmesser von 380 mm aufgewachsen. Das Entfernen des Werkzeugoriginals aus Silicium wurde aufgrund der größeren Erfahrung mit dem dafür erforderlichen Prozeß vom Projektpartner IOF durchgeführt (Abb. 21).

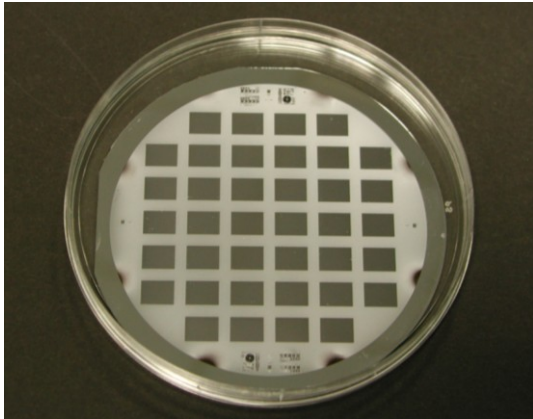


Abb. 18: Mittels Tiefenätzen in Silicium erstelltes Werkzeugoriginal

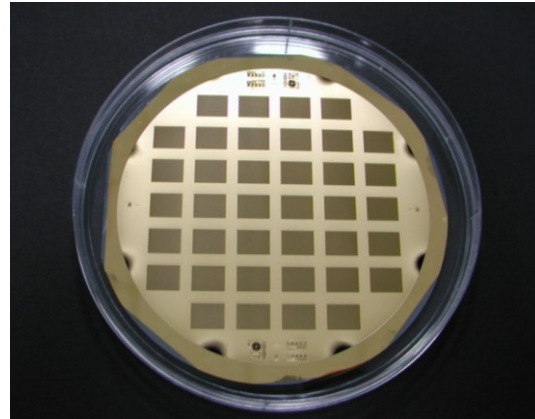


Abb. 19: Werkzeugoriginal mit Goldbeschichtung für die Galvanik

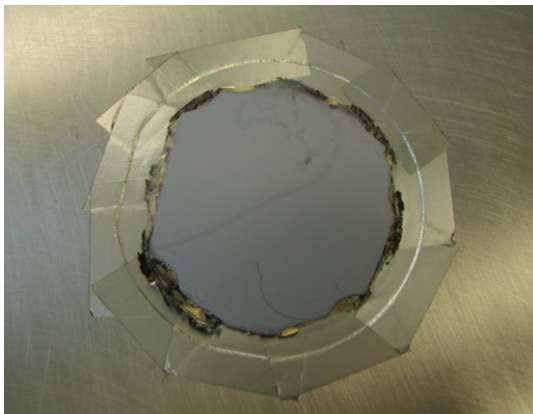


Abb. 20: Werkzeugoriginal (grau) mit galvanisch aufgewachsenem Nickel

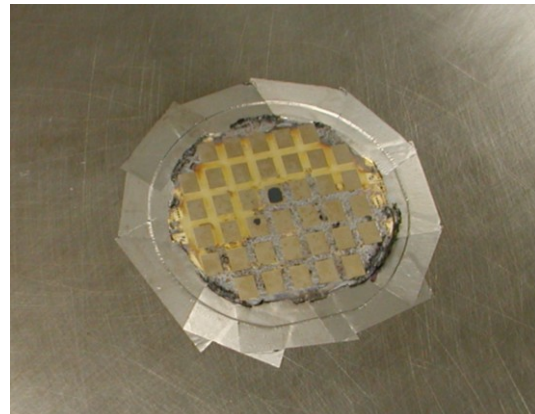


Abb. 21: Nickelwerkzeug nach Entfernen des Werkzeugoriginals

In Abb. 18 bis Abb. 19 ist exemplarisch die gesamte Prozeßkette zur Erstellung eines Prägewerkzeuges vom mittels Bosch-Prozeß erstellten Werkzeugoriginal bis zum Nickelwerkzeug dargestellt, wobei im Rahmen des Vorhabens insgesamt drei Werkzeugoriginals auf diese Weise prozessiert wurden. In allen Fällen kam es während des Galvanikschrittes zu einer Unterwanderung der Goldschicht mit Nickel, d. h. es befand sich Nickel zwischen Werkzeugoriginal aus Silicium und der Galvanikstartschicht aus Gold. Dies ist z. B. deutlich an dem unregelmäßigen Rand des Werkzeugoriginals (Abb. 20) sowie an der z. T. unregelmäßigen und aufgerauhten Oberfläche der Stege zwischen den Mikrolinsen-Arrays auf dem Nickelwerkzeug nach Entfernen des Werkzeugoriginals (Abb. 21) zu erkennen.

Trotzdem wurde der Versuch unternommen die Struktur unter Verwendung dieser Werkzeuge mittels Heißprägen in Kunststoff abzuformen (Abb. 22 und Abb. 23). In allen Fällen kam es beim Entformen zum Abreißen des Kunststoffes durch ein Verhaken mit dem Werkzeug aufgrund der aufgerauhten bzw. auch beschädigten Werkzeugoberfläche. Zur Verdeutlichung zeigt Abb. 24 eine Mikroskopaufnahme



der Oberfläche eines der Werkzeugoriginale während in Abb. 25 die Oberfläche einer mit dem daraus galvanisch replizierten Fertigungswerkzeug angefertigten Kunststoffabformung dargestellt ist.

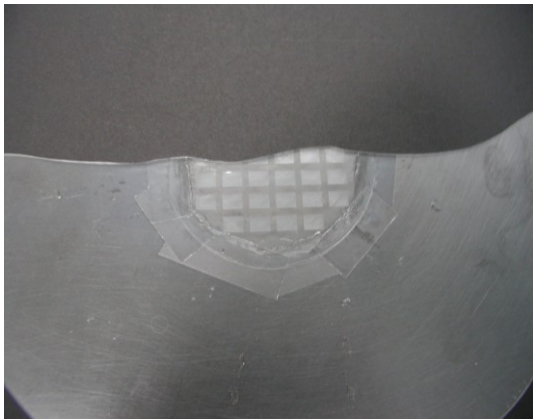


Abb. 22: Mittels Heißprägen erstellte Kunststoffabformung (abgerissen)

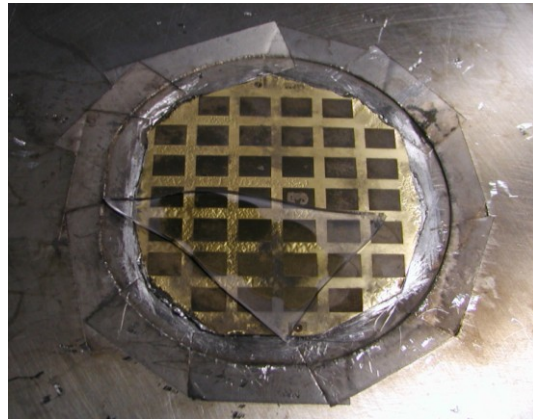


Abb. 23: Fertigungswerkzeug mit abgerissenem Kunststoffrest

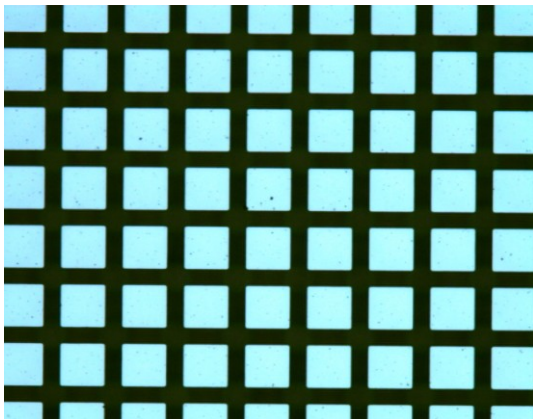


Abb. 24: Mikroskopaufnahme der Oberfläche des Werkzeugoriginals

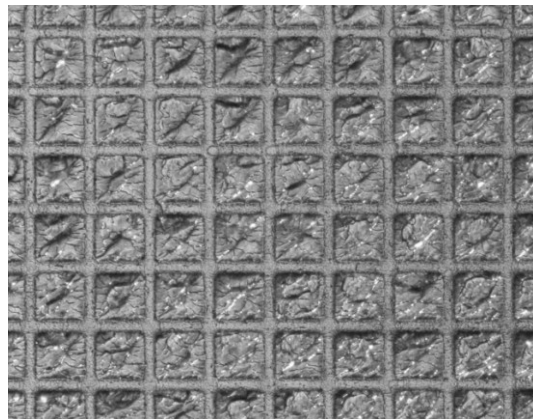


Abb. 25: Mikroskopaufnahme der Oberfläche der Kunststoffabformung

Aus diesen Ergebnissen und basierend auf den guten Resultaten die außerhalb des Vorhabens bei der galvanischen Replikation von anderen Werkzeugoriginalen (Polymer auf Glas, Photoresist) erzielt werden konnten, wurde geschlußfolgert, daß Werkzeugoriginale aus Silicium möglicherweise nicht für den Galvanikprozeß geeignet sind. Um dies zu evaluieren und möglicherweise zu einem besseren Fertigungswerkzeug zu gelangen, wurden durch den Projektpartner IOF unter Verwendung der am ZMN Ilmenau generierten Fotomaske Werkzeugoriginale mittels UV-Replikation in SU 8 hergestellt. Zur genaueren Analyse der Ursachen für die Unterwanderung der Goldschicht mit Nickel wurde eines der in SU 8 erstellten Werkzeugoriginale im Hinblick auf die Einhaltung der Geometrie der Grabenstruktur untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, daß der an einer ausgewählten Position gemessene Winkel der Grabenwände nur etwa  $1,4^\circ$  betrug. Wesentlich kritischer ist das Auftreten von Hinterschnitten (Abb. 26 und Abb. 27), die nach vielfältigen Versuchen durch den Einsatz eines Mikrolinsen-Arrays als Streuscheibe zwar vermindert, deren Auftreten aber auch hier nicht vollständig ausgeschlossen werden konnte.

Das Auftreten von Hinterschnitten oder auch von Unebenheiten der Grabenwände im Werkzeugoriginal führt zu abgeschatteten Bereichen (Abb. 27), in denen sich

während des Beschichtungsprozesses zum Aufbringen der Galvanikstartschicht kein Material ablagern kann, d. h. in diesen Bereichen fehlt aufgrund der Abschattung die Galvanikstartschicht. Mit großer Wahrscheinlichkeit sind das die Stellen, an denen bei allen untersuchten Werkzeugoriginalen die Unterwanderung der Goldschicht mit Nickel im Galvanikprozeß beginnt und sich dann immer weiter in das Material fortsetzt.

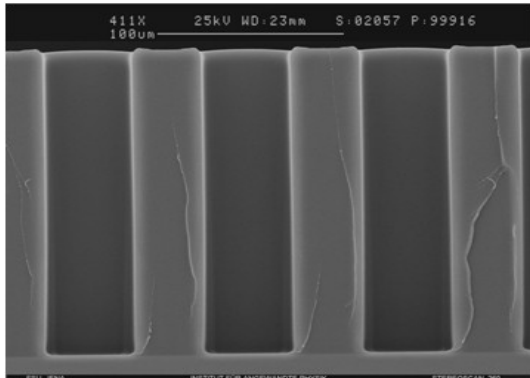


Abb. 26: Schnittbild der Struktur des Werkzeugoriginals aus SU 8

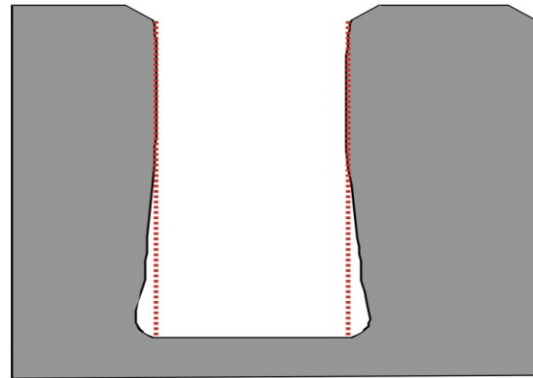


Abb. 27: Schematische Darstellung mit Hinterschnitt (Grabensohle)

Trotz der mit hoher Wahrscheinlichkeit immer noch vorhandenen Hinterschnitte wurde ein Werkzeugoriginal aus SU 8 analog der Silicium-Originale prozessiert und anschließend zum Testen von Reinigungsmöglichkeiten von auf diese Weise erstellten Fertigungswerkzeugen verwendet. Hintergrund dafür war, daß bei der Separation Rückstände des für das Werkzeugoriginal verwendeten Polymers auf dem replizierten Werkzeug, speziell auch in den Strukturen, verbleiben können. Speziell im Fall des äußerst resistenten SU 8 lassen sich diese Rückstände nicht mittels herkömmlicher Reinigungsverfahren entfernen. Darum wurde hierfür, auch in Vorbereitung auf die Untersuchung von alternativen Konzepten zur Erstellung von Strukturen zur Kanalseparation, der Versuch der Beseitigung der Rückstände mittels Plasmabestrahlung unternommen. Damit konnten die auf dem replizierten Werkzeug vorhandenen Polymerrückstände erfolgreich entfernt werden.

## 2.3 Abgrenzung von optischen Kanälen mittels Blendenstrukturen

Da während der Analyse der Ursachen für die Unterwanderung der Goldschicht mit Nickel bei allen Werkzeugoriginalen mit Kreuzgrabenstruktur kein Verfahren zur wirklich sicheren Vermeidung der auftretenden Hinterschnitte identifiziert werden konnte, wurde nach alternativen Lösungen zur Realisierung einer Struktur zur Separation der optischen Kanäle gesucht. Eine mögliche Alternative zur Struktur der gekreuzten Gräben stellt die Abgrenzung von benachbarten Kanälen mittels Blenden bzw. geschwärzter Bereiche direkt auf den optischen Oberflächen dar. Das Modell einer solchen Struktur ist in Abb. 28 dargestellt. Dabei wird das Optikmodul mit Trennwänden zwischen den Einzellinsen versehen die höher aus dem Mikrolinsen-Array herausstehen als die Linsen und nach der Abformung in Kunststoff selektiv, z. B. mittels einer Walze oder Tampondruckverfahren, mit absorbierender schwarzer Farbe oder Lack versehen werden können. Da nachgewiesen werden konnte, daß auf dem replizierten Werkzeug vorhandene Rückstände von SU 8 mittels Plasmareinigung entfernt werden können bietet sich

für die Erstellung von entsprechenden Werkzeugoriginalen SU 8 an, wobei auch hier die Abformbarkeit der Strukturen ein wichtiger zu beachtender Punkt war.

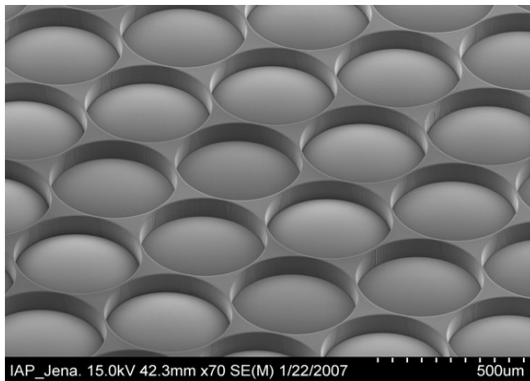


Abb. 28: Dreidimensionale Darstellung einer Struktur zur Kanalseparation mittels Blenden zwischen den Linsen

Die Werkzeugoriginalen aus SU 8 (Abb. 29) wurden vom Projektpartner IOF analog angefertigt, bei Fresnel Optics und am Precision Technology Center analog der Werkzeugoriginalen mit Kreuzgrabenstruktur prozessiert und anschließend bei einem externen Partner, der R3T GmbH in Taufkirchen, einer Plasmareinigung zum Entfernen der Polymerrückstände unterzogen. Mit dem derart prozessierten Fertigungswerkzeug (Abb. 30) wurde das Mikrolinsen-Array mit Trennwänden in Kunststoff abgeformt (Abb. 31 und Abb. 32).

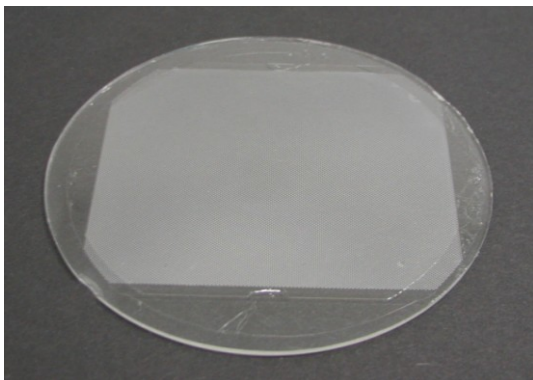


Abb. 29: Werkzeugoriginal aus SU 8 auf Glassubstrat



Abb. 30: Fertigungswerkzeug nach Replikation und Plasmareinigung

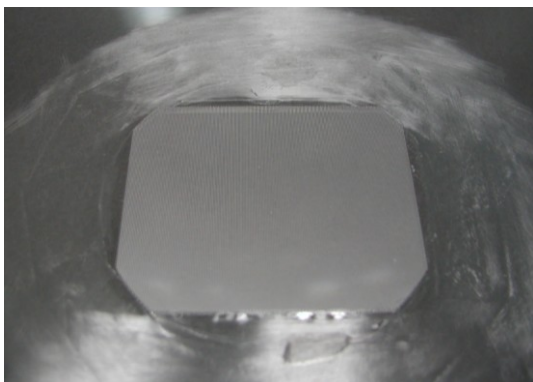


Abb. 31: Mittels Heißprägen erstellte Abformung des Mikrolinsen-Arrays

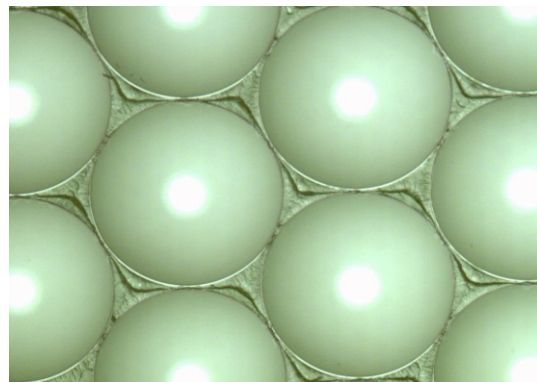


Abb. 32: Ausschnitt des Mikrolinsen-Arrays unter dem Mikroskop

In Abb. 32 sind deutlich die sehr gut abgeformten Mikrolinsen mit den Zwischenbereichen zu erkennen, wobei die Oberfläche der Zwischenbereiche

extrem aufgeraut ist. Weitergehende Analysen haben ergeben, daß die zwischen den Mikrolinsen befindlichen Trennwände zur Kanalseparation beim Trennen von Fertigungswerkzeug und Kunststoff abgerissen sind. Die Ursache hierfür liegt in der in diesen ersten Versuchen immer noch extremen Steilheit der Trennwände begründet. Durch eine entsprechend angepaßte Prozeßführung bei der Erstellung der Werkzeugoriginale kann die Steilheit der Trennwände soweit verringert werden, daß diese beim Trennen von Fertigungswerkzeug und Kunststoff nicht mehr abreißen. Durch eine entsprechende Anpassung des optischen Designs an die zur sicheren Entformung erforderliche Neigung der Trennwände stellt das Mikrolinsen-Array mit Trennwänden einen realisierbaren Ansatz zur Separation von optischen Kanälen nicht nur für das künstliche Facettenauge dar. Dabei erfordert die Prozeßanpassung zur Erstellung entsprechender Werkzeugoriginale, neben der Anpassung des optischen Designs, eine größere Anzahl an Versuchen, die jeweils die gesamte Prozeßkette von der Originalerstellung bis hin zum abgeformten Kunststoffteil beinhalten. In Anbetracht der vorhandenen Restlaufzeit von etwa vier Monaten war es nicht mehr möglich, die hierfür erforderlichen, umfangreichen Arbeiten im Rahmen des Vorhabens umzusetzen.

### **3 Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Ziel des Managements war es ein komplexes Know-How zu entwickeln, um nach erfolgreichem Projektende als Zulieferer von Optikmodulen für das Produkt ultraflache Kamera auftreten zu können. Im Rahmen des Vorhabens wurden von Fresnel Optics Fragestellungen zur Fertigung von Werkzeugoriginalen mittels Präzisionsdiamantschneiden, der Erstellung von Fertigungswerkzeugen mittels galvanischer Replikation sowie der daran anschließenden Abformung in Kunststoff bearbeitet. Die intensive Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, insbesondere mit dem IOF Jena, machte es möglich, daß Fresnel Optics seine Fähigkeiten unter anderem auf dem Gebiet der Werkzeugfertigung weiter ausbauen konnte. Die Komplexität des Vorhabens ermöglichte außerdem, vorhandene Technologien weiterzuentwickeln und somit Zugang zu neuen Produktfeldern zu erhalten. Die durchgeführten Arbeiten haben für das Unternehmen einen besonderen Fortschritt in den Bereichen Werkzeugfertigung und Heißprägen gebracht.

Grundlegende Voraussetzung für die Replikation optischer Komponenten ist die Erstellung der entsprechenden Werkzeugoriginale aus denen anschließend mittels galvanischer Abformung die erforderlichen Fertigungswerkzeuge repliziert werden. Die Replikation der Werkzeugoriginale ist erforderlich, da sich deren direkter Einsatz im Fertigungsprozeß aufgrund der Gefahr einer Beschädigung verbietet. Da die Fertigung der optischen Komponenten unter Verwendung der galvanisch replizierten Fertigungswerkzeuge erfolgt, wurden die Werkzeugreplikate und die Abformungen in Kunststoff nicht unabhängig voneinander untersucht.

Die im Rahmen des Vorhabens erforderlichen Werkzeugoriginale wurden entweder in einem verbundenen Unternehmen, dem Precision Technology Center, mittels Präzisionsdiamantschneiden angefertigt oder vom Projektpartner IOF zur Verfügung gestellt. In letzterem Fall wurden die Werkzeugoriginale bei Fresnel Optics für die anschließende galvanische Replikation konditioniert, d. h. mit einer leitfähigen Startschicht für den Galvanikprozeß versehen. Nach der galvanischen Replikation der Originale am Precision Technology Center wurden die optischen

Strukturen von Fresnel Optics in Kunststoff abgeformt und in enger Kooperation mit dem Projektpartner IOF analysiert.

Eine wesentliche Komponente des auf dem Prinzip der künstlichen Facettenaugen basierenden Objektives ist das Mikrolinsen-Array zur Realisierung der optischen Abbildung, das im Rahmen des Vorhabens im Wafermaßstab in Kunststoff abgeformt wurde. In den heißgeprägten Abformungen wurde eine Formtreue der Linsen von etwa 1% nachgewiesen, was innerhalb der zulässigen Toleranz liegt. Im Gegensatz dazu war die Ebenheit der Abformungen mit  $\pm 11 \mu\text{m}$  um einen Faktor von 1,8 und die laterale Präzision mit  $\pm 5 \mu\text{m}$  um einen Faktor von 2,5 größer als die zulässige Toleranz. Die ermittelten Schwankungen der Ebenheit und lateralen Präzision über den gesamten Wafer können auf die Schrumpfung des Polymers während des Präge- und anschließenden Abkühlprozesses zurückgeführt werden. Bis zu diesem Zeitpunkt gab es bei Fresnel Optics keine weitergehenden Erfahrungen bzgl. der Realisierung der für das künstliche Facettenauge erforderlichen engen Toleranzen durch optimierte Kontrolle der Schrumpfung im Heißprägeprozess. Für die Realisierung dieser Anforderungen wurde mit externen Partnern ein Prägewerkzeug mit elektrischer Heizung und Wasserkühlung entwickelt und aufgebaut. Erste Untersuchungen im Rahmen kundenspezifischer Projekte haben gezeigt, daß damit die geforderten Toleranzen bzgl. Ebenheit und lateraler Präzision erreicht werden können.

Der Hauptschwerpunkt der Arbeiten von Fresnel Optics war die Untersuchung von Technologien zur Separation optischer Kanäle um ein Übersprechen und die daraus resultierende Entstehung von Geisterbildern zu verhindern. Hierfür wurden die Ansätze einer Struktur aus gekreuzten Gräben sowie der Implementation von Blendenstrukturen direkt auf dem Mikrolinsen-Array verfolgt.

Als ein erster Ansatz zur Erstellung der Kreuzgrabenstruktur wurde versucht, ein Werkzeugoriginal für ein  $2 \times 2$  Sensorarray mittels Präzisionsdiamantschneiden zu erstellen. Obwohl bereits während der Erstellung des Werkzeuglayouts deutlich wurde, daß mit einem diamantgeschnittenen Werkzeugoriginal nur die negative Generation der eigentlich zu realisierenden Struktur in den Kunststoffabformungen umsetzbar ist, wurde das Werkzeugoriginal realisiert um nachzuweisen, daß solche höchst anspruchsvollen Strukturen mittels Präzisionsdiamantschneiden realisiert werden können. Weiterhin konnte die direkt geschnittene Struktur mit der erforderlichen Präzision in Kunststoff abgeformt werden. Da die Frage der Generation bei der Umsetzung anderer Geometrien lösbar ist konnte mit den durchgeführten Untersuchungen gezeigt werden, daß solche fertigungstechnisch höchst anspruchsvollen Strukturen mittels Präzisionsdiamantschneiden in ein Werkzeugoriginal umgesetzt werden können.

Als alternativer Ansatz wurden Werkzeugoriginale für die Kreuzgrabenstruktur mittels Tiefenätzen in Silicium erstellt und anschließend galvanisch repliziert. Dabei trat in allen Fällen eine Unterwanderung der Galvanikstartschicht aus Gold mit Nickel auf. Weitergehende Analysen haben ergeben, daß die Strukturen im Originalwerkzeug Hinterschnitte aufweisen, durch die es zu einer Abschattung tiefer liegender Strukturbereiche kommt. Dies ist problematisch für das Aufbringen der Galvanikstartschicht, da diese in den abgeschatteten Bereichen nicht bzw. zumindest nicht vollständig aufgebracht wird und es kann davon ausgegangen werden, daß genau diese Stellen die Ausgangspunkte der Unterwanderung mit



Nickel sind. Als Ursache für die Unterwanderung mit Nickel kommen aber nicht nur Hinterschnitte in Frage, der Effekt kann auch z. B. durch Unebenheiten an den steilen Wänden hervorgerufen werden, wenn diese aufgrund ihrer Lage und Geometrie zu den beschriebenen Abschattungen führen.

Als Alternative zur Kreuzgrabenstruktur für die Separation der optischen Kanäle wurde eine Abgrenzung mittels direkt auf dem Mikrolinsen-Array implementierter Blendenstrukturen untersucht. Es hat sich gezeigt, daß in den mit dem ersten Werkzeug angefertigten Kunststoffabformungen die Blendenstrukturen abgerissen waren. Ursache hierfür war der noch zu steile Flankenwinkel der Wände, der aber durch eine angepaßte Prozeßführung bei der Erstellung des Werkzeugoriginals soweit verringert werden kann, daß eine sichere Entformung möglich ist. Durch eine entsprechende Anpassung des optischen Designs an die zur sicheren Entformung erforderliche Neigung der Trennwände stellt das Mikrolinsen-Array mit Trennwänden einen realisierbaren Ansatz zur Separation von optischen Kanälen nicht nur für das künstliche Facettenauge dar. Die Separation der optischen Kanäle wird durch anschließendes Aufbringen von schwarzer Farbe oder Lack mittels Walze oder Tampondruck realisiert.

Zum Ende der Laufzeit des Vorhabens konnten die gesetzten Ziele nur teilweise realisiert werden. Speziell die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Untersuchungen zu technologischen Lösungen im Hinblick auf die Separation der optischen Kanäle haben erst relativ spät im Projektverlauf zur Identifizierung einer Erfolg versprechenden Lösung geführt (Mikrolinsen-Array mit Blendenstrukturen). Die Weiterentwicklung dieses Ansatzes erfordert, neben der Anpassung des Prozesses zur Erstellung entsprechender Werkzeugoriginals, sowohl eine Anpassung des optischen Designs als auch eine größere Anzahl an Versuchen, die jeweils die gesamte Prozeßkette von der Originalerstellung bis hin zum abgeformten Kunststoffteil beinhalten. In Anbetracht der vorhandenen Restlaufzeit von etwa vier Monaten war es nicht mehr möglich, die hierfür erforderlichen, umfangreichen Arbeiten im Rahmen des Vorhabens umzusetzen. Entsprechende weiterführende Untersuchungen und Entwicklungen, auch auf der Basis von kundenspezifischen Projekten, werden im Unternehmen befürwortet und es wird aktiv nach Applikationen zur Weiterführung der Entwicklungsleistungen gesucht.

#### **4 Relevante F&E-Ergebnisse von dritter Seite**

Von dritter Seite sind innerhalb des Berichtszeitraumes keine für die Durchführung des Vorhabens relevanten F&E-Ergebnisse bekannt geworden. Für das Vorhaben relevante Erfindungen und Schutzanmeldungen sind nicht bekannt.